

Bab 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kebisingan

Kebisingan, meskipun sering dianggap sebagai gangguan kecil, memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan dan kualitas hidup manusia. Dalam ranah akustik, elektronika, dan fisika, istilah "suara" dan "kebisingan" sering digunakan secara bergantian. Namun, terdapat perbedaan mendasar antara keduanya. Suara secara teknis adalah getaran yang merambat melalui udara atau medium lainnya yang dapat didengar oleh telinga manusia atau hewan. Sebaliknya, kebisingan merujuk pada suara yang tidak diinginkan atau mengganggu, yang berpotensi menimbulkan efek negatif pada pendengar (Fink, 2019).

Suara atau kebisingan ini dapat dinilai berdasarkan ukuran besaran desibel (dB), yang merupakan satuan logaritmik untuk mengukur intensitas suara. Desibel digunakan untuk menyatakan seberapa keras atau kuat suara dari berbagai sumber. Skala desibel memungkinkan kita untuk memahami perbedaan antara tingkat kebisingan yang berbeda dengan lebih jelas. Misalnya, bisikan lembut memiliki intensitas sekitar 30 dB, sedangkan percakapan normal sekitar 60-70 dB. Suara lalu lintas di jalan raya dapat mencapai 80-90 dB, sementara suara jet lepas landas bisa mencapai 100-140 dB atau lebih tinggi (BYJUS, 2023).

Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) merekomendasikan bahwa paparan kebisingan di atas 70 dB dalam jangka panjang dapat menyebabkan risiko kerusakan pendengaran (Berglund et al., 1999). Paparan kebisingan yang berlebihan dapat merusak sel-sel rambut di telinga bagian dalam, yang berfungsi mengirimkan sinyal suara ke otak. Kerusakan ini seringkali bersifat permanen dan mengakibatkan gangguan pendengaran yang serius. Selain itu, kebisingan juga dapat mengganggu pola tidur, menyebabkan seseorang sulit tidur atau mengalami tidur yang tidak nyenyak. Gangguan tidur ini pada akhirnya dapat berdampak negatif pada kesehatan fisik dan mental seseorang.

Kebisingan juga diketahui dapat meningkatkan tingkat stres. Suara yang tidak diinginkan dapat merangsang produksi hormon stres seperti kortisol, yang dapat mempengaruhi suasana hati dan kesejahteraan mental. Pada anak-anak, kebisingan dapat mengganggu konsentrasi dan proses belajar, yang pada akhirnya mempengaruhi prestasi akademis mereka. Di tempat kerja, kebisingan dapat mengalihkan perhatian, mengurangi konsentrasi, dan menyebabkan kesalahan, yang secara keseluruhan menurunkan produktivitas (Perspectives, 2004).

Untuk mengurangi dampak negatif kebisingan, berbagai langkah pengelolaan dapat diambil. Pemerintah dapat memberlakukan regulasi untuk membatasi tingkat kebisingan di lingkungan tertentu, seperti zona industri dan pemukiman. Penggunaan teknologi seperti peredam suara dan isolasi akustik di bangunan juga dapat membantu mengurangi kebisingan. Selain itu, meningkatkan kesadaran masyarakat tentang dampak kebisingan dan cara-cara menguranginya dapat membantu menciptakan lingkungan yang lebih sehat.

Secara keseluruhan, kebisingan bukan hanya gangguan sederhana tetapi merupakan masalah serius yang mempengaruhi berbagai aspek kesehatan dan kesejahteraan manusia. Oleh karena itu, pengelolaan kebisingan menjadi sangat penting untuk meningkatkan kualitas hidup dan kesehatan masyarakat.

2.2 Masalah Perkotaan

Pada area perkotaan yang semakin ramai, pencemaran suaranya juga kian meningkat. Berdasarkan data oleh WHO, hal ini diakibatkan oleh beberapa faktor utama, seperti pertumbuhan populasi yang pesat, perkembangan perkotaan yang luas, kurangnya regulasi anti-kebisingan, penggunaan perangkat

elektronik, dan transportasi yang intensif (WHO, 2018). Data lain menunjukkan bahwa selama satu hari, orang yang tinggal di lingkungan perkotaan umumnya mendapati kebisingan dari berbagai sumber, di antaranya jalan raya, pusat perbelanjaan, sekolah, tempat kerja, pusat rekreasi, dan rumah. Sehingga rasanya saat ini sulit bagi manusia untuk sepenuhnya terhindar dari kebisingan (Amoatey et al., 2020).

Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa lalu lintas jalan raya merupakan sumber utama kebisingan yang mengganggu sebagian besar penduduk perkotaan. Tingkat kebisingan di jalan raya dapat mencapai kisaran 70-80 dB (Purnanta MA et al., 2008). Kendaraan bermotor, termasuk sepeda motor dan mobil, adalah salah satu sumber kebisingan lalu lintas yang signifikan, disebabkan oleh berbagai faktor seperti suara klakson dan suara dari knalpot (Wulandari I., 2007).

Selain kebisingan, kondisi iklim mikro perkotaan juga menampilkan perbedaan signifikan dalam hal suhu dan pola gerakan udara dibandingkan dengan daerah lainnya. Salah satu ciri paling mencolok adalah suhu yang lebih tinggi di kawasan perkotaan, terutama selama periode panas, yang disebabkan oleh fenomena Urban Heat Island (UHI). UHI menghasilkan peningkatan suhu udara di kota-kota akibat albedo rendah, material bangunan yang menyerap panas, dan pelepasan panas dari aktivitas manusia. Selain itu, kondisi iklim mikro perkotaan juga memiliki variasi suhu harian yang lebih besar, dengan suhu yang cepat meningkat pada siang hari dan turun tajam pada malam hari.

Pola gerak udara di kawasan perkotaan dipengaruhi oleh struktur bangunan dan jaringan jalan raya. Bangunan tinggi dapat menciptakan zona stagnasi dengan aliran udara yang lebih lambat, sementara terowongan dan jalan raya memengaruhi aliran udara lokal. Vegetasi seperti taman kota dan pepohonan juga berperan dalam memengaruhi pola gerak udara dengan menciptakan zona penyejuk dan perbedaan suhu lokal. Pemahaman yang lebih baik tentang perbedaan ini penting untuk perencanaan perkotaan yang berkelanjutan dan untuk mengurangi dampak negatif iklim mikro perkotaan, termasuk polusi udara dan kenyamanan termal penduduk (Geletić et al., 2019).

2.3 Permasalahan Desain Pasif

Upaya pengendalian kebisingan yang paling sederhana adalah dengan membuat ruangan sedemikian tertutup, sehingga tidak ada celah untuk energi bunyi dapat merambat masuk ke dalam bangunan melalui udara. Tentunya, hal ini berpengaruh besar terhadap terapan desain pasif bangunan, khususnya kebutuhan akan penghawaan alami untuk menghadirkan kenyamanan termal penghuni. Sehingga yang terjadi adalah peningkatan permintaan akan penggunaan AC untuk pengkondisian udara pada bangunan.

Nyatanya penggunaan AC dinilai kurang baik terkait dengan pelepasan emisi gas rumah kaca yang berpengaruh secara langsung terhadap perubahan iklim ekstrem. Studi menguraikan banyaknya pelepasan gas emisi oleh penggunaan AC ini terdiri atas emisi energi operasional, emisi bawaan dalam pembuatannya, dan emisi refrigerant (Woods et al., 2022).

Penggunaan ventilasi alami menjadi pilihan yang bersih sekaligus efektif untuk meningkatkan kenyamanan termal sambil mempertahankan konsumsi energi pendinginan yang rendah di zona musim panas yang panas-lembap. Menggunakan ventilasi alami dapat membantu mengurangi permintaan energi pendinginan sebesar 10–30% dibandingkan dengan tidak menggunakan ventilasi alami. Potensi penghematan energinya sangat dipengaruhi oleh entalpi udara luar, diikuti oleh laju aliran udara (He et al., 2017). Meskipun begitu, terdapat beberapa kekurangan dalam menggunakan ventilasi alami mencakup:

- Tidak efektif dalam mengurangi emisi gas, debu, dan uap di lingkungan kerja (Winardo & Wimala, 2023)
- Tidak cocok untuk lingkungan dengan tingkat kebisingan tinggi (De Salis et al., 2002)

- Sangat bergantung pada kondisi cuaca dan tidak selalu efektif dalam mengatur kecepatan dan tekanan angin (Badan Standarisasi Nasional, 2001)

Pada terapanannya, terdapat banyak aspek yang perlu diperhatikan dalam membuat desain ventilasi alami pada bangunan. Pemilihan lahan pada daerah berudara menjadi poin utama agar bangunan dapat menerapkan ventilasi alami, lingkungan yang sejuk dan sehat juga menjadi modal utama keberhasilan ventilasi alami. Sumbu panjang bangunan juga perlu diletakkan relatif sejajar dengan sumbu barat-timur, untuk meminimalkan paparan sinar matahari langsung terhadap kulit bangunan, begitu juga dengan letak bukaan yang harus terlindung dari sinar matahari langsung, dalam hal ini, tritisan, pohon, dan tirai dapat membantu. Bukaan diusahakan melebar untuk memberikan keleluasaan terhadap angin bergerak dalam ruang (Satwiko, 2008).

2.4 Kondisi Iklim Tropis

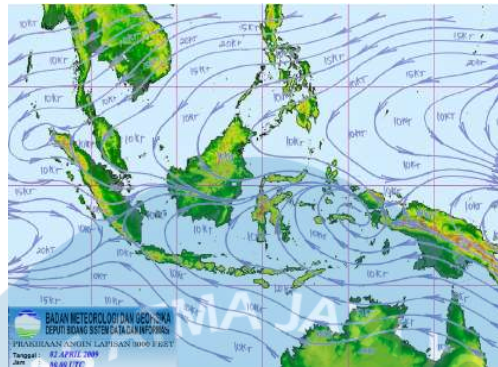
Iklim, berasal dari kata Yunani "klima," diartikan sebagai wilayah dengan kondisi tertentu suhu, kekeringan, angin, cahaya, dan sebagainya. Secara lebih ilmiah, iklim dapat dijelaskan sebagai integrasi dalam rentang waktu dari keadaan fisik lingkungan atmosfer, yang khas dari suatu lokasi geografis. Sebaliknya, cuaca hanya mencakup keadaan atmosfer pada suatu titik waktu di lokasi tertentu, sehingga iklim dapat dianggap sebagai integrasi dalam rentang waktu dari kondisi cuaca.

Radiasi surya, yang merupakan pengaruh kunci pada iklim, diterima oleh Bumi dalam spektrum panjang gelombang yang beragam. Meskipun intensitas radiasi surya dianggap sebagai konstan surya, variasi terjadi karena perubahan keluaran matahari dan jarak Bumi-matahari. Keseimbangan termal Bumi, melibatkan penyerapan dan pelepasan panas melalui radiasi, evaporasi, dan konveksi (Koenigsberger et al., 2013).

Wilayah tropis menerima radiasi matahari langsung lebih banyak dibandingkan dengan bagian lain Bumi karena lengkungan planet ini. Hal ini menyebabkan suhu yang lebih tinggi dan memengaruhi pola cuaca secara global. Sebagai contoh, radiasi harian bulanan dapat mencapai lebih dari 6,5 kWh/m² selama musim hujan di beberapa bagian wilayah pesisir dalam iklim tropis (Li & Li, 2021). Penyerapan energi matahari di wilayah tropis sangat signifikan, dengan sebagian besar energi ini ditambahkan ke lautan daripada atmosfer (Helwig et al., n.d.). Radiasi matahari yang tegak lurus pada tengah hari hampir sepanjang tahun di wilayah tropis berkontribusi pada suhu tahunan rata-rata yang lebih tinggi dan perubahan musiman yang lebih sedikit (Cover, 2008). Ini sejalan dengan penguapan di iklim tropis lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi lainnya karena jumlah energi matahari langsung yang diterima di tropis, yang menghasilkan lebih banyak penguapan daripada di lintang yang lebih tinggi (NASA, n.d.). Hal ini disebabkan oleh suhu yang lebih tinggi di iklim tropis juga meningkatkan jumlah energi yang diperlukan untuk penguapan, menghasilkan tingkat penguapan yang lebih tinggi (*Evaporation and Climate*, 2023).

Dalam konteks iklim tropis, proses pendinginan biasa dicapai melalui konveksi, dimana suhu udara luar harus lebih rendah agar penyejukan dapat berjalan dengan efektif (Gunawan et al., 2012). Ventilasi alami bekerja dengan mengurangi panas serta memberikan pendinginan yang terstruktur melalui pengaturan lingkungan sekitarnya. Proses pertukaran udara melalui ventilasi alami menyebabkan transfer panas melalui konveksi. Pendinginan ruangan melalui ventilasi alami terjadi dengan cara mendispersikan panas secara berkelanjutan, sehingga panas dalam udara tidak terakumulasi di dalam ruangan. Pengurangan panas ini dicapai dengan meningkatkan kecepatan aliran udara. Sensasi kesejukan akan tercipta saat pertukaran udara terjadi dengan kecepatan melebihi 25 sentimeter per detik. Keadaan ini umumnya terbentuk melalui berbagai metode yang disesuaikan dengan kondisi dan lokasi bangunan (Nugroho, 2019).

Selain melakukan pengaturan lingkungan sekitar, Pola pergerakan angin juga menentukan perletakaan bukaan, yang pada dasarnya memiliki kemiripan karakteristik secara global karena melibatkan perdagangan, westerlies, dan angin polar, yang terbentuk karena perbedaan pemanasan di berbagai zona.



Gambar 1 Pola pergerakan angin di Indonesia berdasarkan data BMKG.

Kecepatan angin sangat bervariasi tergantung pada lokasi dan lingkungan geografisnya, sehingga perencanaan penghawaan alami perlu disesuaikan dengan karakteristik lingkungan sekitarnya. Topografi, seperti pegunungan, memainkan peran krusial dalam membentuk pola angin regional dan kondisi cuaca yang terkait, serta mempengaruhi distribusi hujan di berbagai wilayah (Koenigsberger et al., 2013). Di Indonesia, pola angin umumnya dapat diprediksi dengan moderat, dipengaruhi oleh musim monsun yang berbeda. Monsun dari selatan dan timur berhembus pada bulan Juni hingga September, sementara monsun dari barat laut terjadi dari Desember hingga Maret. Interaksi antara pola angin yang berkepanjangan dengan topografi lokal menciptakan variasi signifikan dalam curah hujan di seluruh kepulauan (Facts and Details, n.d.).

Dengan demikian, untuk mengoptimalkan penggunaan penghawaan alami, perencanaan harus mempertimbangkan perbedaan kecepatan angin yang signifikan berdasarkan lokasi dan kondisi lingkungan. Hal ini penting untuk menyesuaikan desain ventilasi alami agar dapat efektif beradaptasi dengan dinamika lingkungan sekitarnya dan memastikan kenyamanan serta efisiensi dalam penggunaan energi.

2.5 Prinsip Aliran Udara

Berdasarkan prinsipnya, aliran udara (angin) bergerak karena adanya perbedaan tekanan di permukaan bumi. Angin cenderung bergerak dari daerah tekanan udara tinggi ke daerah tekanan udara rendah. Angin yang bertiup di permukaan bumi terjadi karena perbedaan penerimaan radiasi matahari, yang menghasilkan perbedaan suhu udara. Perbedaan suhu udara inilah yang menyebabkan perbedaan tekanan, yang pada akhirnya menyebabkan pergerakan udara. Menurut hukum alam tertentu, udara bergerak sehingga pergerakan udara ini relatif teratur dan dapat diprediksi (Boutet, 1987).

Lechner, dalam bukunya 'Cooling, Heating, and Lighting' (Lechner, 2015), menjelaskan beberapa prinsip terkait aliran udara:

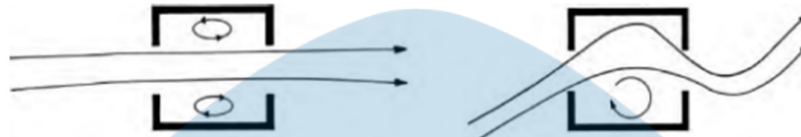
- Aliran udara disebabkan oleh perbedaan suhu atau perbedaan tekanan.
- Udara memiliki massa, sehingga pergerakannya cenderung lurus. Oleh karena itu, jika dipaksa mengubah arah alirannya, aliran udara ini akan mengikuti kurva.
- Garis yang menggambarkan aliran udara harus digambar secara berkelanjutan karena udara yang mendekati bangunan harus sama dengan udara yang meninggalkan bangunan.

2.6 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Aliran Udara

Beberapa hal yang memengaruhi aliran udara (arah dan kecepatan) pada objek:

1. Orientasi Bukaannya dan Arah Angin

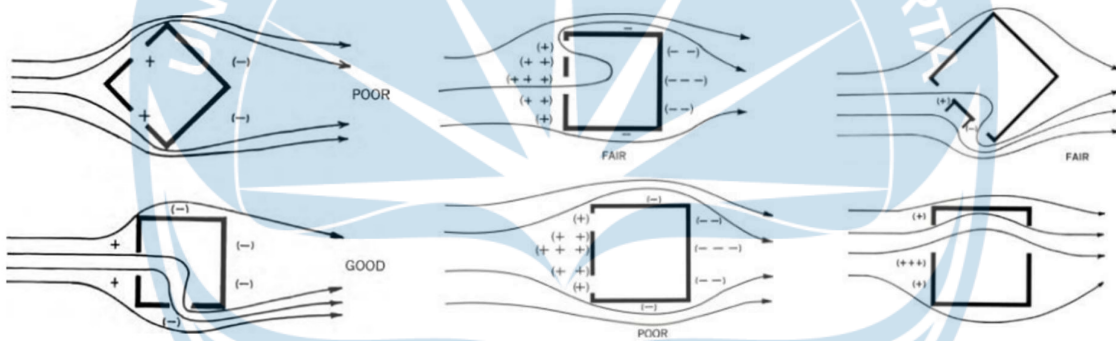
Angin memberikan tekanan maksimum saat tegak lurus dengan suatu permukaan, dan tekanan berkurang sekitar 50 persen saat angin berada pada sudut miring sekitar 45° .



Gambar 2 Efek orientasi pembukaan terhadap angin

2. Lokasi Bukaannya

Bukaan di bidang yang bersebelahan dapat baik atau buruk, tergantung pada distribusi tekanan, yang bervariasi dengan arah angin (Lechner, 2015).

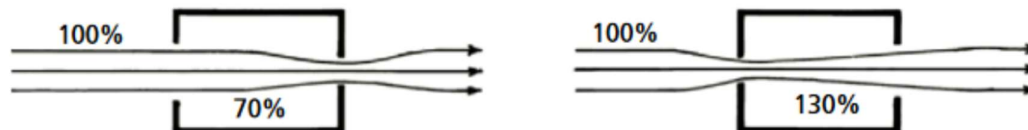


Gambar 3 Pengaruh lokasi bukaan terhadap angin

3. Dimensi Pembukaan

Dalam kondisi kecepatan dan arah angin yang terbatas, lubang ventilasi dapat dilengkapi dengan fitur tambahan untuk mengarahkan dan meningkatkan kecepatan angin sebelum masuk ke dalam lubang ventilasi. Sayap horizontal adalah fitur di inlet yang dipasang secara horizontal untuk mengarahkan angin dari luar ke dalam bangunan (S et al., 2014).

Ventilasi akan lebih lancar jika didukung dengan kecepatan udara yang memadai. Dalam kondisi udara hampir diam (sekitar 0 m/s), desain bukaan harus mendorong pergerakan yang lebih cepat atau meningkatkan kecepatan udara (Mediastika, 2002). Ini dapat dicapai dengan memilih dimensi bukaan yang berbeda antara inlet dan outlet (Gambar 8).



Gambar 4 Pengaruh Ukuran Pembukaan Terhadap Angin

Dari teori-teori tersebut, arah angin, jenis pembukaan, lokasi pembukaan, arah pembukaan, dimensi pembukaan, dan posisi pembukaan memengaruhi jumlah dan arah angin. Oleh karena itu, objek yang dapat menyesuaikan arah angin dan desain komponen pembukaan akan menjadi sarana ventilasi yang baik.

2.7 Roster

Roster dalam konteks arsitektur merupakan sarana ventilasi alami yang digunakan untuk memungkinkan aliran udara masuk dan keluar dari bangunan melalui lubang-lubang kecil pada blok yang disusun pada dinding bangunan (Johnson & Williams, 2018). Beberapa karakteristik dan keunggulan utama dari roster melibatkan:

- Sirkulasi Udara: Roster hadir dalam berbagai bentuk dan dimensi, dengan pola dan pengaturan yang berbeda, memungkinkan tingkat sirkulasi udara yang bervariasi. Ini mendukung ventilasi alami di dalam bangunan, membantu mengontrol suhu, mengurangi kelembaban, dan meningkatkan kualitas udara di dalam ruangan.
- Perlindungan dari Presipitasi: Desain khusus roster memungkinkan aliran udara melalui dinding sambil mencegah masuknya presipitasi, seperti hujan horizontal atau yang didorong oleh angin.
- Privasi: Roster dapat digunakan pada aplikasi perumahan, memungkinkan sirkulasi udara tanpa mengorbankan privasi, terutama pada perumahan berkepadatan tinggi.
- Ketahanan: Roster konvensional terdiri dari beton pracetak yang diperkuat dengan rangka galvanis untuk meningkatkan ketahanannya, sehingga awet digunakan di area luar.
- Estetika: Roster dapat didesain dengan pola dan konfigurasi yang beragam, menjadikannya tidak hanya fungsional tetapi juga menarik secara visual.

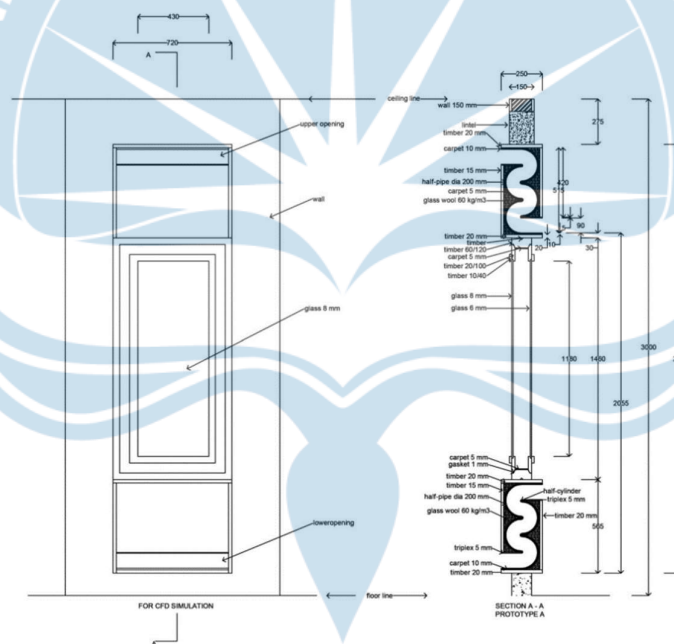
Kemudahan roster dalam segi pemasangan dan perawatan juga menjadi sebuah kelebihan dalam penggunaannya, ditambah kebutuhan bahan pendukung yang relatif minim. Proses pemasangan roster juga tidak memerlukan tenaga kerja yang banyak. Selain itu, roster memiliki ketahanan terhadap cuaca dan kerusakan yang baik (Kuat et al., 2006). Roster dapat dibuat dari berbagai jenis material, pada umumnya bahan beton digunakan karena memiliki keunggulan dalam hal harga dan biaya produksi yang lebih terjangkau jika dibandingkan dengan bahan lain. Penggunaan roster sebagai elemen arsitektural telah lama menjadi bagian integral dalam desain bangunan, terutama untuk mengatur pencahayaan dan penghawaan alami. Namun, seringkali penggunaan roster ini menyebabkan masalah kebocoran suara ke area sekitarnya (Johnson & Williams, 2018).



Gambar 5 Ragam model roster

2.8 Ventilasi Pengurang Kebisingan

Sebuah penelitian oleh Satwiko, meninjau bagaimana membuat sebuah ventilasi dengan tetap dapat mengurangi kebocoran suara (Satwiko et al., 2019). Kajian ini mengusulkan pengembangan *Noise-Reducing Vents for Windows* (NRVW). Terinspirasi dari jendela 'krepyak' Indonesia, prototipe NRVW dihasilkan setelah melalui tinjauan literatur menyeluruh yang merinci studi dan perangkat yang telah ada. Metode pengukuran laboratorium dan simulasi komputer digunakan untuk menguji performa isolasi suara dan ventilasi dari prototipe ini, dengan fokus pada rating STC dan OITC, serta kecepatan udara dalam ruangan dengan variasi kecepatan angin luar. Hasil eksperimen dan simulasi menunjukkan bahwa NRVW memiliki rating STC sebesar 18 dan OITC sebesar 16. Namun, temuan yang mencolok adalah bahwa ventilasi ini secara drastis mengurangi kecepatan udara dari kecepatan angin luar 1–5 m/s menjadi hanya 0,015–0,086 m/s di dalam ruangan. Diskusi mendalam melibatkan faktor-faktor yang memengaruhi kinerja ventilasi, seperti desain terowongan udara, modifikasi eksternal dan internal, serta suhu udara luar. Penjelasan mengenai pengurangan kecepatan udara yang signifikan tersebut dapat dikaitkan dengan desain khusus ventilasi, yang mungkin memperlambat aliran udara secara efektif. Kesimpulannya, meskipun NRVW menawarkan solusi inovatif untuk mengurangi kebisingan, pengurangan drastis dalam kecepatan udara memerlukan pertimbangan lebih lanjut untuk menjaga keseimbangan antara fungsi pengurangan kebisingan dan ventilasi alami yang optimal. Pengembangan selanjutnya mungkin memerlukan modifikasi desain, pemilihan bahan yang tepat, dan penelitian lebih lanjut untuk menjaga keseimbangan tersebut.



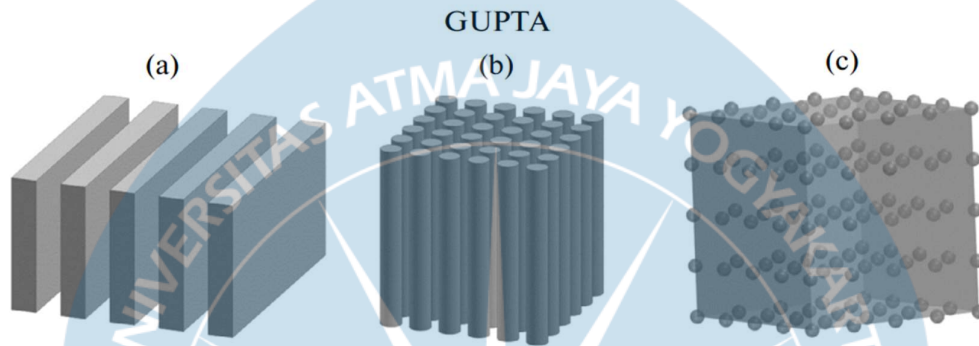
Gambar 6 Prototipe NRVW terdiri dari ventilasi pengurang kebisingan bagian atas dan bawah, yang dikombinasikan dengan jendela berlapis ganda di antaranya.

2.9 Sonic Crystal

Kebisingan di sekitar area roster adalah masalah umum yang sering terjadi dalam praktiknya. Namun, penelitian terbaru telah menghadirkan inovasi menjanjikan untuk mengatasi masalah ini, yang dikenal sebagai Sonic Crystal. Dengan pendekatan yang menarik untuk mengontrol perambatan suara, Sonic Crystal mengadopsi prinsip dasar yang serupa dengan difraksi cahaya melalui celah. Hal ini memungkinkannya untuk memanipulasi perambatan suara dengan cara yang inovatif dan efektif (Yang & Zhang, 2019).

2.9.1 Struktur Periodik

Sebuah *crystal* adalah materi padat di mana atom, molekul, atau ion-nya disusun dalam struktur mikroskopis yang sangat teratur, membentuk kisi kristal yang meluas ke semua arah. Pola ini memberikan sifat khas pada kristal, karena merupakan hasil dari pengulangan kelompok atom yang identik, menciptakan susunan periodik yang teratur (Myerson & Ginde, 1978). Sementara itu, istilah *sonic* digunakan untuk merujuk pada hal-hal yang terkait dengan suara atau gelombang suara. Secara lebih umum, *sonic* mencakup fenomena-fenomena yang berada dalam rentang pendengaran telinga manusia, dan istilah ini sering digunakan dalam fisika dan musik (Merriam-Webster.com Dictionary, n.d.). Dengan demikian, konsep Sonic Crystal mengacu pada struktur kristal yang memiliki sifat akustik khusus atau memengaruhi gelombang suara.

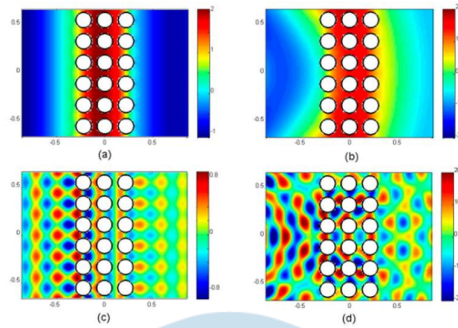


Gambar 7 Berbagai jenis Sonic Crystal. (a) Sonic Crystal 1D yang terdiri dari pelat yang disusun secara periodik; (b) Sonic Crystal 2D dengan silinder yang disusun pada kisi persegi; (c) Sonic Crystal 3D yang terdiri dari susunan periodik bola dalam susunan kubik sederhana (Gupta, 2014).

Sonic Crystal, dengan susunan periodiknya, memiliki karakteristik unik yang memungkinkan redaman suara selektif pada rentang frekuensi tertentu, dikenal sebagai celah pita, di mana perambatan suara mengalami penurunan signifikan. Penurunan ini disebabkan oleh interferensi destruktif gelombang dalam rentang frekuensi tersebut. Studi numerik menunjukkan bahwa gelombang yang merambat dalam Sonic Crystal mengalami perilaku evanescent, menyebabkan redaman suara pada wilayah celah pita (Gupta et al., 2011). Saat gelombang suara berinteraksi dengan struktur periodik ini, beberapa frekuensi membentuk jalur yang bisa dilewati tanpa hambatan, sementara frekuensi lain mengalami penurunan, mengakibatkan redaman suara signifikan pada frekuensi tertentu. Celah pita direpresentasikan oleh wilayah yang berbayang di Gambar 8, menunjukkan bahwa dalam area gelap tersebut, tidak ada frekuensi suara yang dapat bergerak pada bilangan gelombang tertentu (k).

2.9.2 Penerapan Konsep Sonic Crystal

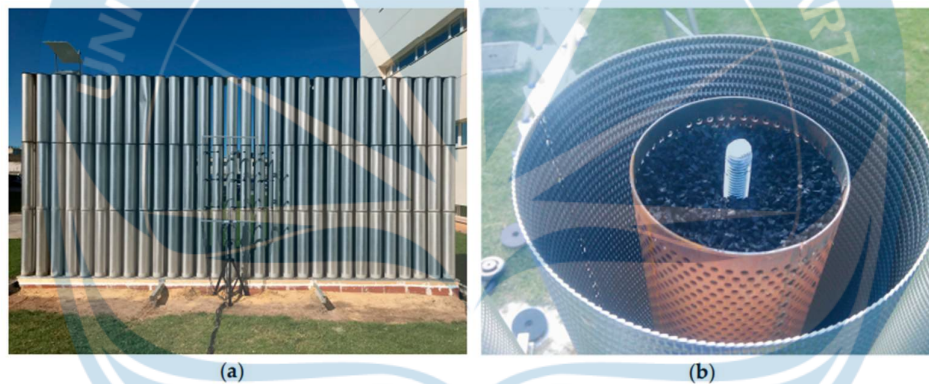
Studi yang dilakukan Rungta memanfaatkan teknologi ini dengan memanfaatkan prinsip dasar difraksi dan interferensi gelombang suara untuk menahan atau memantulkan suara berfrekuensi tinggi. Rungta membuat Sonic Crystal yang terdiri dari sebuah rangkaian periodik bahan dengan kepadatan yang berbeda-beda, yang memungkinkan terjadinya pemantulan gelombang suara secara efektif (Rungta et al., 2013).



Gambar 8 Cuplikan peta tekanan total yang dihitung ketika gelombang datar (panel kiri) dan gelombang silinder (panel kanan) berinteraksi dengan penghalang akustik yang terdiri dari tiga baris silinder kaku yang tersusun dalam konfigurasi persegi (Dimitrijević et al., 2019)

Studi lain oleh Dimitrijevic (Dimitrijević et al., 2019) menunjukkan penggunaan material *micro-perforated metal* sebagai pelengkap utama Sonic Crystal dibantu dengan isian serbuk karet dalam Sonic Crystal, sehingga memiliki dampak yang signifikan dalam mereduksi kebisingan. Material *micro-perforated metal*.

ini memiliki lubang-lubang kecil yang memungkinkan suara masuk dan berinteraksi dengan serbuk karet di dalamnya. Sedangkan serbuk karet berfungsi untuk meningkatkan disipasi energi dan meningkatkan sifat penyerapan suara secara luas (Dimitrijević et al., 2019).



Gambar 9 Contoh penghalang Sonic Crystal (SC) yang diimplementasikan di kampus Universitat Politècnica de València: (a) Penampilan contoh penghalang SC yang terdiri dari tiga baris unit silinder yang menyerap, beserta setup eksperimental; (b) potongan

2.9.3 Faktor yang Berpengaruh

1. Bentuk

Penentuan bentuk berpengaruh terhadap efektivitas penghalang suara, terutama kaitannya pada arah sebaran pantulan energi suara. Penggunaan bentuk silinder dalam penghalang suara memiliki beberapa keunggulan. Pertama, silinder memiliki geometri yang relatif sederhana dan mudah diproduksi, sehingga memudahkan dalam proses pembuatan penghalang suara. Selain itu, bentuk silinder juga memungkinkan untuk menciptakan susunan periodik yang teratur, seperti dalam penghalang Sonic Crystal, yang dapat meningkatkan efisiensi penyerapan suara. Selain itu, silinder memiliki sifat pemantulan suara yang lebih baik daripada bentuk geometri lainnya, seperti bidang datar, karena permukaan silinder yang melengkung dapat memantulkan suara dengan sudut yang lebih bervariasi. Oleh karena itu, penggunaan bentuk silinder sebagai Sonic Crystal dapat memberikan kinerja akustik yang lebih baik dalam hal isolasi suara dan penyerapan suara (Dimitrijević et al., 2019).

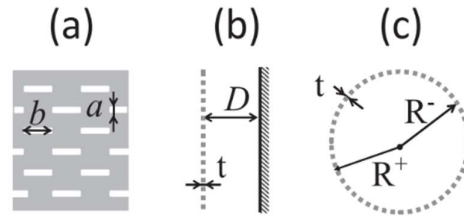
2. Jumlah Lapisan dan Pori

Pada tahun 2011, Universitat Politècnica de València (UPV) melakukan pembangunan dan karakterisasi penghalang kebisingan berbentuk kotak. Penghalang ini terdiri dari sebaran silinder kosong *micro-perforated* yang diatur secara periodik. Struktur penghalang ini memiliki tiga baris, masing-masing terdiri dari 30 unit silinder dengan tinggi 3 m dan radius eksternal 8 cm. Dengan periode kisi penghalang 0,22 m dengan fraksi pengisian scatterers sebesar 41,5%. Unit bangunan penghalang ditingkatkan dengan inti berpori serbuk karet dan lapisan luar aluminium. Tujuan inti berpori adalah untuk meredam komponen frekuensi tinggi dari energi akustik yang diteruskan. Selanjutnya, analisis dilakukan terhadap empat sampel penghalang yang berbeda, yang masing-masing dibangun dengan variasi jumlah lapisan dan jenis scatterer. Hasil perbandingan redaman antara sampel-sampel tersebut menunjukkan bahwa redaman penghalang meningkat dengan jumlah lapisan, dan sampel dengan inti berpori menunjukkan redaman yang lebih besar pada beberapa frekuensi tertentu. Analisis lanjutan dilakukan terhadap salah satu sampel penghalang dengan menggunakan teknik pengukuran standar dan pemodelan berdasarkan metode elemen hingga (*finite element method*) yang merupakan metode yang biasa digunakan secara numerik untuk menyelesaikan persamaan diferensial yang muncul dalam rekayasa dan pemodelan matematika. Dengan tujuan memberikan perbandingan langsung dengan penghalang lain yang menggunakan jenis scatterer yang berbeda (Dimitrijević et al., 2019).

3. Logam Berpori

Material logam berlubang memiliki tiga aplikasi utama dalam bidang akustik. Pertama, sebagai pelindung atau penutup dekoratif untuk bahan akustik, di mana logam berlubang membantu gelombang suara melewati untuk bertemu dengan perlakuan akustik di belakangnya. Kedua, sebagai penyerap suara resonan terpilih, di mana logam berlubang berperan dalam menentukan frekuensi mana yang diserap untuk tujuan tertentu. Ketiga, sebagai difuser aliran udara, di mana logam berlubang digunakan untuk memecah turbulensi dalam aliran udara, terutama dalam fasilitas uji aerodinamika. Secara keseluruhan, material ini memiliki keuntungan unik dalam menyerap energi bunyi sambil tetap memberikan kemudahan pembersihan dan penyelesaian (Schultz, 1986). Sonic Crystal yang terbuat dari silinder kaku hanya efektif sebagai peredam pada frekuensi celah pita, dan memerlukan struktur yang sangat tebal untuk bekerja pada rentang frekuensi di mana penghalang klasik digunakan. Untuk mengatasi keterbatasan ini, penggunaan bahan berpori pada scatterer silinder telah meningkatkan kemampuan redaman penghalang berbasis Sonic Crystal (García-Chocano & Sánchez-Dehesa, 2013).

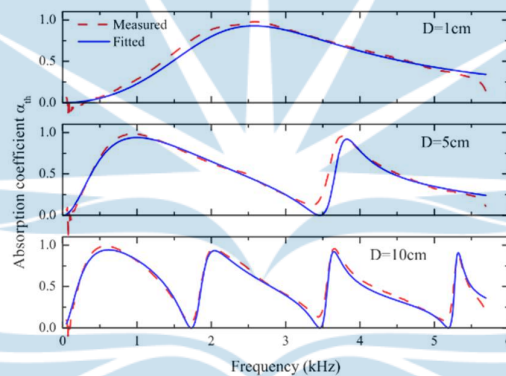
Hal ini didukung oleh penelitian oleh Maa, yang memperkenalkan konsep panel mikroberforasi (*Micro Perforated Metal*) untuk merancang struktur dengan sifat penyerapan yang sangat baik. MPP terdiri dari plat dengan perforasi submilimeter yang didukung oleh rongga udara dan dinding kaku. MPP memberikan profil penyerapan yang baik, terutama pada frekuensi rendah di mana penyerap klasik tidak efisien. Selain itu, MPP bersifat estetik, mudah dibersihkan, bebas serat, dan tahan terhadap lingkungan yang keras (Maa, 2014).



Gambar 10 (a) Sketsa dari panel mikroberforasi yang digunakan dalam penelitian (Garcia-Chocano et al., 2012). Persegi putih menggambarkan mikroberforasi yang dibuat dengan metode pukulan. (b) Tampilan samping dari panel mikroberforasi klasik yang didukung dengan cekungan berketebalan. (c) Sebuah selinder yang dibuat dengan menggulung panel datar. Parameter $R(R_p)$ mewakili radius internal (eksternal) dari selinder dengan ketebalan t .

Penelitian yang dilakukan oleh Garcia (García-Chocano et al., 2012) menguji konfigurasi Sonic Crystal dengan penerapan microperforated metal. Pengaturan dan hasil dari penelitian ini meliputi:

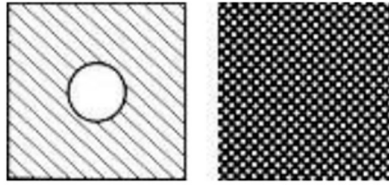
1. Panel terbuat dari aluminium dengan ketebalan $t = 1\text{ mm}$
2. Berdasarkan pengujian, Nilai $D = 1\text{ cm}$ stabil dalam menyerap suara pada tiap rentang frekuensi. (Gambar 12)
3. Penyesuaian terbaik dicapai dengan parameter $a = 48.1\text{ }\mu\text{m}$, $b = 1.61\text{ mm}$.
4. Persentase dari area total panel yang terdiri dari lubang perforasi $r = 3.3\%$.
5. Panel dibuat dengan metode *punching* (tekananan) untuk menghasilkan lubang mikro.



Gambar 11 Koefisien absorpsi yang diukur (garis putus-putus) dan yang disesuaikan secara teoretis (garis solid) dari sampel mikroberforasi yang didukung dengan rongga berketebalan $D = 1, 5$, dan 10 cm

Secara keseluruhan, sifat serap panel berforasi (datar) meningkat secara signifikan ketika digulung dan didistribusikan dalam kisi, menjadikannya material akustik dengan kemampuan serap suara yang luas. Struktur dengan 3 baris silinder setinggi 3 meter telah dikarakterisasi, menunjukkan kesesuaian baik dengan simulasi. Hasil ini menunjukkan bahwa struktur tersebut efektif untuk meredam suara di lingkungan berisik. Absorpsi suara yang luas serta resistansi angin yang rendah menjadikan penghalang ini cocok untuk digunakan pada tempat-tempat dengan kebutuhan aliran udara yang baik.

Secara dasar, objek pada penelitian ini menggunakan 2 jenis material dengan fungsi yang berbeda. Material *diffuse* (perforated metal) digunakan bertujuan untuk memecah energi bunyi yang nantinya akan diteruskan untuk diserap menggunakan material penyerap. Namun, sifat material berbahan logam ini juga sangat reflektif terhadap gelombang suara (Dampa, 2022). Sifat reflektif logam berasal dari kepadatan dan kekuatannya, serta permukaannya yang terpolishing (Soundproof Living, 2021). Sehingga penentuan spesifikasi perforasi juga sangat berpengaruh terhadap kemampuan objek menyerap gelombang suara.



Gambar 12 Dua contoh logam berlubang dengan persentase luas area terbuka yang sama

Banyak orang mengasumsikan bahwa semakin besar luas area terbuka lembaran, semakin mudah suara bisa melewati. Secara umum, asumsi ini benar, tetapi tidak selalu. Misalnya, dengan membuat lembaran dengan 10% luas area terbuka dalam dua cara: dengan membuat lubang besar tunggal di tengah atau dengan lubang berukuran sangat kecil secara keseluruhan. Dalam kasus pertama, daripada memiliki material penutup transparan, kami akan memiliki area terbuka kecil sepenuhnya di tengah lembaran (10% dari total area); tetapi sisa lembaran akan sepenuhnya tidak tembus bagi suara, memantulkan semua suara. Dalam kasus kedua, seluruh lembaran hampir sepenuhnya transparan bagi suara, karena area solid kecil di antara lubang terlalu kecil untuk menangkap gelombang suara. Untuk transparansi tinggi, pertimbangan terpenting adalah memiliki banyak lubang kecil yang rapat. Lebih baik untuk meminimalkan ukuran batang (ukuran bagian solid antara lubang) dan meminimalkan ketebalan lembaran, daripada berkonsentrasi pada luas area terbuka (Schultz, 1986).

Untuk membantu memilih lembaran yang cukup transparan untuk diaplikasikan, buku “ACOUSTICAL USES FOR PERFORATED METALS: Principles and Applications” (Schultz, 1986). memperkenalkan parameter yang disebut Indeks Transparansi (TI) yang diberikan oleh rumus berikut:

$$TI = nd^2/ta^2 = 0.04 P/\pi ta^2$$

Dimana:

n = jumlah lubang per inci persegi;

d = diameter lubang (inci);

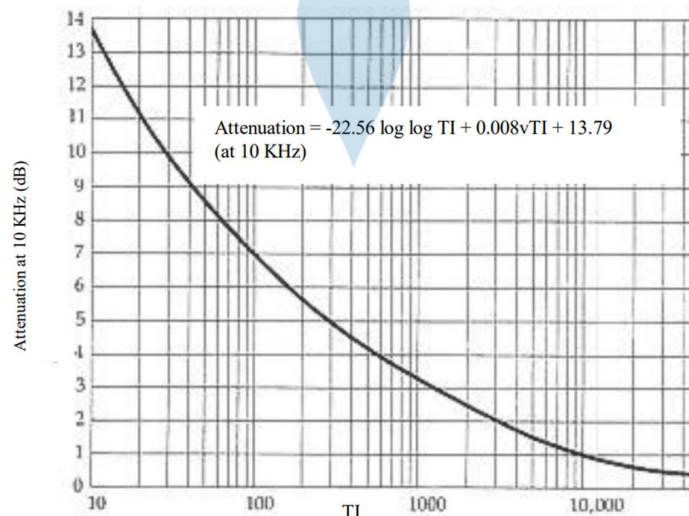
t = ketebalan lembaran (inci);

a = jarak terpendek antara lubang (inci);

a = b - d, dimana b = jarak pusat lubang (inci);

P = persentase area terbuka lembaran.

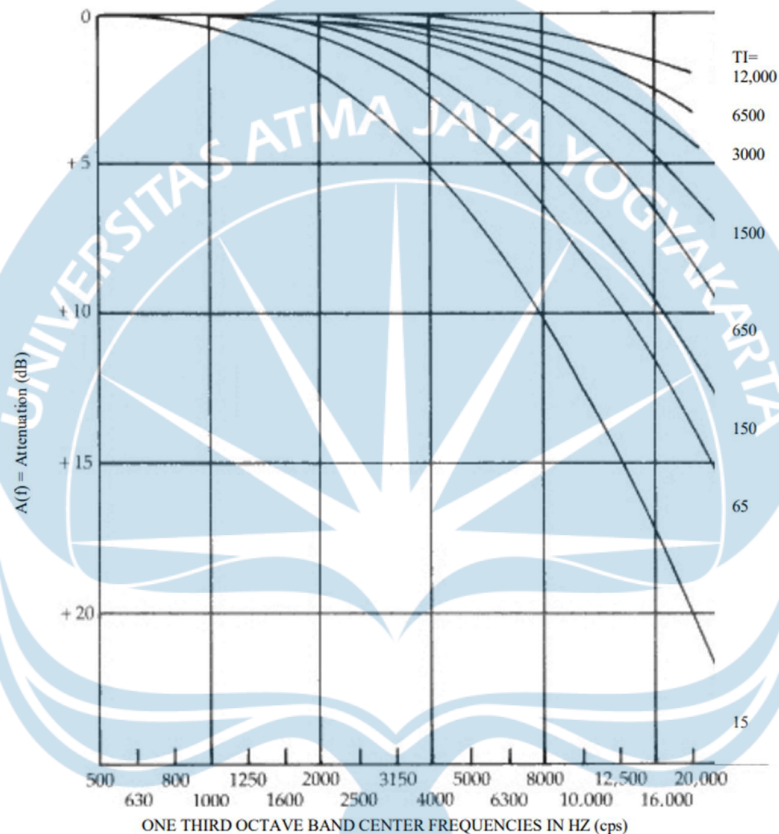
Dari nilai TI, kita dapat mengantisipasi seberapa besar gelombang suara pada frekuensi 10 kHz terhambat saat melewati lembaran berlubang, sesuai dengan kurva pada Gambar. Selanjutnya, dari situ kita dapat membuat kurva untuk penghambatan pada frekuensi yang lebih rendah.



Gambar 13 Kurva Penurunan Suara pada 10.000 Hz vs TI

Dari grafik diatas dapat disimpulkan semakin kecil TI (Indeks Transparansi) semakin besar pengurangan dB. Pengurangan dB ini akan semakin menurun pada frekuensi yang semakin rendah. Nilai TI meningkat seiring dengan ukuran lubang dan jumlah lubang per inci persegi meningkat, serta seiring dengan ketebalan lembaran dan jarak antara lubang berkurang. Untuk nilai TI kurang dari 2000, transparansi suara berkurang dengan cepat, dan logam berlubang menghalangi lewatnya suara.

Gambar berikut menunjukkan data yang diukur di laboratorium yang mengindikasikan bagaimana suara frekuensi tinggi dihambat saat melewati sampel logam berlubang dengan nilai Transparansi Indeks (TI) yang berbeda. Skala horizontal menunjukkan frekuensi dalam Hz (siklus per detik); skala vertikal menunjukkan penurunan dalam desibel.



Gambar 14 Penurunan suara vs frekuensi untuk sampel logam berlubang dengan TI yang berbeda.

Pada saat frekuensi meningkat, terjadi penurunan redaman yang lebih besar. ini menjelaskan bahwa gelombang suara dipantulkan dari lembaran (*perforated metal*) tersebut dan gagal lewat untuk mencapai perlakuan akustik yang berada di belakangnya. Oleh karena itu, jika perlakuan akustik dimaksudkan untuk menyerap suara yang datang, Perlu dipertimbangkan seberapa banyak perforasi logam yang diperlukan untuk mengurangi efisiensi penyerapan suara intrinsik dari material penyerap yang terpasang di belakangnya dengan menghalangi akses suara ke material penyerap tersebut. Untuk tujuan ini, diperkenalkan Faktor Akses (AF). Secara umum, Faktor Akses (AF) pada setiap frekuensi terkait dengan Redaman (A) pada frekuensi tersebut oleh rumus berikut:

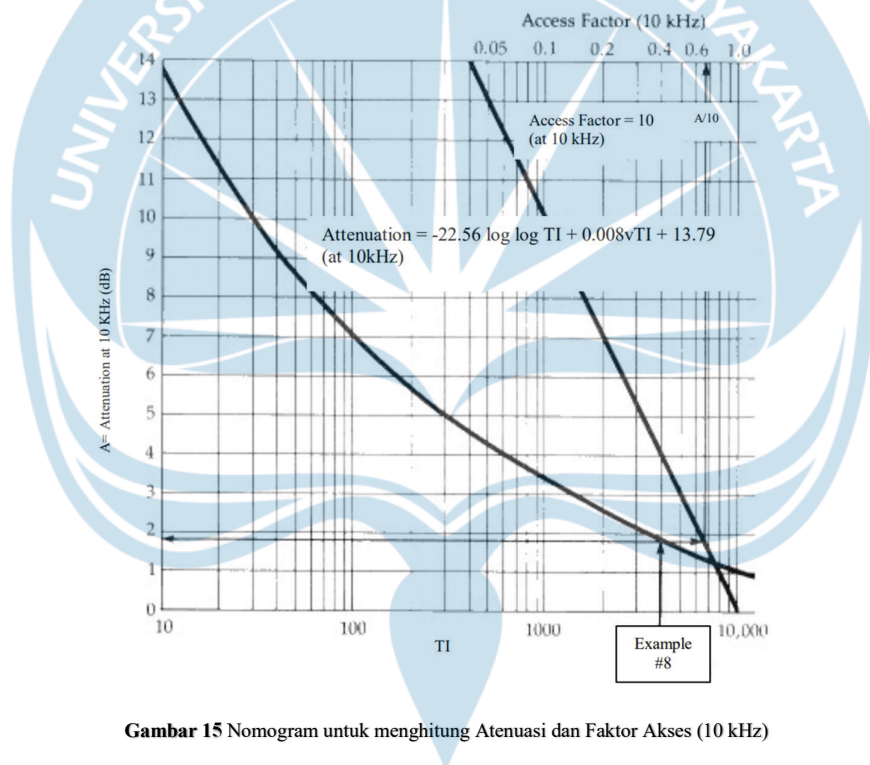
$$AF = 10^{-(A/10)}$$

Faktor Akses (AF) menjelaskan seberapa banyak gelombang suara dapat mengakses perlakuan akustik yang ada di belakangnya. Jika AF adalah 1.0, maka aksesnya sempurna dan 100% energi suara dapat melewati. Namun, jika AF adalah 0.50, hanya separuh energi suara yang dapat melewati; separuh

sisanya dipantulkan dari permukaan lembaran dan tidak pernah mencapai perlakuan akustik sama sekali. Oleh karena itu, untuk menemukan efisiensi penyerapan suara yang efektif dari sebuah bahan akustik yang tertutup dengan lembaran logam berlubang, kita cukup mengalikan koefisien penyerapan suara dari bahan dasar pada setiap frekuensi dengan Faktor Akses yang sesuai untuk lembaran logam.

Misalkan kita menutupi material serat kaca sepanjang 1 inci yang disebutkan di atas, yang memiliki koefisien 0,99 pada 4000 Hz, dengan lembaran logam berlubang yang memiliki TI = 1500, yang sesuai dengan Faktor Akses pada 4000 Hz sebesar 0,82. Maka koefisien penyerapan suara efektif dari kombinasi tersebut adalah $0,99 \times 0,82 = 0,81$. Tentu saja, lembaran berlubang dengan TI hanya 1500 merupakan pilihan buruk untuk aplikasi ini. Inti dari desain akustik dalam "pendekatan transparansi" adalah untuk menemukan lembaran dengan nilai TI yang tinggi sebisa mungkin, sesuai dengan kebutuhan proyek lainnya. Jelas dari angka-angka yang diberikan bahwa jika kita memilih lembaran dengan transparansi yang dapat diterima pada 10.000 Hz (yaitu, A kecil dan AF tinggi), maka semuanya jauh lebih baik pada frekuensi yang lebih rendah.

Nomogram berikut memungkinkan kita langsung beralih dari nilai TI yang dihitung ke Atenuasi Suara atau Faktor Akses, keduanya pada 10.000 Hz.



Gambar 15 Nomogram untuk menghitung Atenuasi dan Faktor Akses (10 kHz)

Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

Masukkan skala horizontal bawah dengan nilai TI untuk lembaran berlubang dan bergerak langsung ke atas untuk berpotongan dengan kurva bawah dari dua kurva tersebut. Gerakkan ke kiri dari titik potongan ini hingga mencapai skala vertikal, di mana kita dapat membaca atenuasi pada 10.000 Hz dalam desibel.

Selanjutnya, jika kita menginginkan nilai Faktor Akses, dapat dilakukan dengan menggerakkan titik potongan pertama ke kanan atau kiri untuk mencari perpotongannya dengan garis miring atas, lalu naik dari titik potongan kedua untuk mencapai skala horizontal atas, di mana kita dapat membaca Faktor Akses pada 10.000 Hz untuk lembaran berlubang.

Material Serap

Kemampuan suatu bahan untuk meredam bunyi yang datang, diukur berdasarkan koefisien serap (*NRC*). Dihitung dalam persen, atau pecahan bernilai $0 < \alpha < 1$. Dimana nilai 0 berarti tidak ada peredaman bunyi, dan nilai 1 berarti bunyi diserap sepenuhnya (Satwiko, 2008). *NRC (Noise Reduction Coefficient)* merupakan nilai rata-rata dari seberapa banyak suara yang bisa diserap oleh produk akustik. Seperti spons menyerap air, produk akustik menyerap suara dan *NRC* memberi tahu kita seberapa banyak suara yang dapat diserap oleh produk-produk tersebut (Audimute, n.d.). Koefisien serap suatu material berbeda pada tiap frekuensi, 125, 250, 500, 1k, 2k, dan 4k Hz merupakan frekuensi yang umum digunakan sebagai representasi keseluruhan frekuensi yang terdengar manusia (eNoiseControl, 2021).

Penelitian oleh Dimitrijević (Dimitrijević et al., 2019) menunjukkan potongan lintang dari unit bangunan silinder (Gambar 9b) yang ditingkatkan, terdiri dari serbuk karet sebagai inti berpori dan lapisan luar aluminium MP. Inti berpori ini terdiri dari serbuk karet yang dimasukkan ke dalam silinder *perforated metal* dengan radius 4 cm dan ketebalan 1 mm. Dengan diameter lubang pada silinder baja mencapai 3 mm dan rasio lubang silinder mencapai 32,6%, dengan begitu silinder tersebut dapat dianggap transparan secara akustik (*acoustically transparent*), memungkinkan suara untuk berinteraksi dengan serbuk karet. Tujuan dari inti berpori adalah untuk menyerap komponen frekuensi tinggi dari energi akustik yang memasuki mikro-lubang dari cangkang aluminium eksternal. Kemampuan inti berpori untuk menyerap energi suara ini menjadi penting dalam mengurangi kebisingan, yang sejalan dengan peran bahan isian dalam Sonic Crystal untuk mengurangi propagasi suara. Oleh karena itu, sifat-sifat akustik dari bahan isian dalam Sonic Crystal berperan penting dalam upaya reduksi suara.

Di sisi lain, penelitian oleh Saggita mengenalkan material komposit berbahan dasar serabut kelapa dengan nilai koefisien absorpsi yang tinggi dan relatif merata pada tiap frekuensi (Putri & Elvaswer, 2017).

Frekuensi (Hz)	Ketebalan / Koefisien Absorpsi Bunyi				
	0,25 cm	0,5 cm	0,75 cm	1 cm	1,25 cm
500	0,58	0,62	0,65	0,70	0,80
1000	0,60	0,65	0,68	0,72	0,78
1500	0,44	0,50	0,60	0,65	0,83
2000	0,60	0,70	0,74	0,78	0,81
2500	0,70	0,75	0,80	0,88	0,92

Tabel 1 Koefisien absorpsi bunyi komposit serabut kelapa

Hasil dari penelitian ini menunjukkan variasi nilai koefisien absorpsi bunyi pada komposit serat sabut kelapa dengan berbagai ketebalan di beberapa frekuensi yang ditunjukkan dalam tabel 1. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai koefisien absorpsi bunyi tertinggi terjadi pada frekuensi 2500 Hz dengan ketebalan 1,25 cm, mencapai 0,92. Peningkatan nilai ini disebabkan oleh pembentukan lebih banyak pori-pori melalui percampuran pasir, semen, air, dan serat sabut kelapa, memungkinkan resonansi dan penyerapan gelombang bunyi di dalam pori-pori.

Sebaliknya, sampel dengan ketebalan 0,25 cm memiliki nilai koefisien absorpsi bunyi terendah sebesar 0,44. Hal ini disebabkan oleh jumlah pori-pori yang lebih sedikit dalam campuran, mengakibatkan sedikitnya gelombang bunyi yang masuk ke dalam pori-pori. Dapat disimpulkan bahwa ketebalan komposit serat sabut kelapa mempengaruhi nilai koefisien absorpsi bunyi, dengan ketebalan yang lebih besar cenderung meningkatkan kemampuan penyerapan bunyi.

Penggunaan material komposit serabut kelapa ini memungkinkan penempatan material serap sebagai kesatuan unit yang utuh dan kuat. sehingga tidak lagi memerlukan rangka, dan dapat menghemat biaya produksi serta kemudahan fabrikasi. Pemilihan material ini juga merespon banyaknya jumlah limbah serabut kelapa yang tersedia pada daerah dengan iklim panas lembab (tropis) (Hunker, 2011).

2.10 Software Simulasi

Dalam penelitian ini, penggunaan simulasi diusulkan sebagai alat yang efektif dalam segi biaya sekaligus memiliki tingkat akurasi yang cukup baik. Penggunaan perangkat lunak simulasi CATT Acoustic dan Ansys Discovery menjadi opsi terpilih sebagai software yang umum digunakan pada penelitian karena memiliki tingkat akurasi yang baik.

2.10.1 CATT Acoustic

CATT Acoustics merupakan perangkat dengan pelacakan sinar yang memungkinkan berbagai prediksi kinerja akustik pada bangunan, memungkinkan pemodelan dan simulasi ruang sebelum dibangun. Ini didasarkan pada pemodelan geometri ruangan, dan dapat berinteraksi dengan beberapa paket desain lainnya, terutama Sketchup (menggunakan plugin pihak ketiga). Selain pemodelan statistik standar bangunan (Sabine/Eyring), CATT juga dapat memprediksi waktu Reverberasi (menggunakan pelacakan sinar daripada metode statistik), Keklaritasan, Definisi, Waktu Tengah, Fraksi Lateral Awal, STI, respons frekuensi. Algoritmanya telah secara konsisten diukur dan divalidasi sebagai salah satu model yang paling akurat jika dibandingkan dengan pengukuran dunia nyata.

Pada penelitian ini, CATT Acoustic digunakan untuk meninjau pengurangan Sound Pressure Level (SPL) yang dihasilkan setelah melalui roster SC. SPL adalah ukuran intensitas suara yang diukur dalam desibel (dB). Dengan menggunakan CATT, peneliti dapat memodelkan objek dengan akurat dan memprediksi seberapa efektif berbagai strategi desain akan mengurangi SPL. Ini dapat mencakup pemodelan geometri batasan (boundary), pembuatan model roster, atau penyesuaian layout Sonic Crystal untuk meningkatkan reduksi kebisingan. Keterbatasan CATT Acoustic ada pada kemampuannya yang tidak dapat menampilkan data grafik pengurangan intensitas suara dalam bentuk range frekuensi, sehingga tidak mendukung untuk merepresentasikan celah pita. Meski begitu, penerapan konsep dasar Sonic Crystal pada roster masih dapat diteliti karena adanya kemampuan software dalam menggambarkan peta sebaran intensitas suara.

2.10.2 SimScale

Dalam penelitian ini, perangkat lunak SimScale digunakan untuk mengevaluasi pengurangan kecepatan udara yang melewati roster Sonic Crystal. SimScale adalah alat simulasi berbasis cloud yang memungkinkan analisis fenomena fisik secara cukup akurat.

Pertama, model 3D dari roster Sonic Crystal dibangun menggunakan alat pemodelan Rhinoceros 3D. Ini mencakup detail geometri dari roster Sonic Crystal. Selanjutnya, kondisi diterapkan pada model. Ini termasuk menentukan kecepatan aliran udara yang diuji dan properti material dari roster Sonic Crystal.

Simulasi kemudian dijalankan secara daring menggunakan algoritma numerik dalam situs SimScale. Ini memungkinkan estimasi perilaku aliran udara yang melalui susunan Sonic Crystal pada roster. Hasil simulasi dianalisis untuk meninjau pengurangan kecepatan udara yang dihasilkan oleh roster Sonic Crystal, termasuk pola aliran udara, distribusi tekanan, dan efek turbulensi.